

Effects of d-wave symmetry on the critical current of YBCO step-edge Josephson junction

Yunseok Hwang^{a,b}, Sunkyung Moon^a, Jong Rok Ahn^a, Soon-Gul Lee^a, Jin-Tae Kim^b

^a Korea University, Seoul, Korea

^b Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Received 22 July 2000

Abstract

We have studied the effects of d-wave symmetry on the critical current of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ step-edge Josephson junctions. The critical current along various misorientation angle was measured and analyzed with the concept of grain-boundary junctions with d-wave symmetry. Experimental results of *c*-oriented YBCO step-edge junctions with various in-plane misorientation angles were qualitatively in good agreement with the theory. The out-of-plane misorientation angle is usually formed between two grains with the *c* axes perpendicular to each other and is normally not controllable.

Keywords : d-wave symmetry, step-edge junction, YBCO

I. 서론

고온초전도 전자 소자를 개발하기 위해서는 조셉슨 접합을 이용해야 한다. 일반적으로 많이 연구되고 있는 조셉슨 접합에서 bicrystal 접합[1], step-edge 접합[2], 그리고 ramp-edge 접합[3] 등이 있다. 이 중에서 bicrystal 접합은 제작이 용이하고 재현성이 좋으며 잡음 특성이 우수하다. 그러나, 가격면에서 불리하고 접합의 위치에 제약성이 있다. 반면, step-edge 접합은 아직까지 재현성에서 문제가 있기는 하나, bicrystal 접합에 비해 가격면에서 유리하고 접합의 위치 선정에 자유로울 뿐 아니라 제대로 만들어지면 bicrystal 접합보다 잡음 특성이 더 우수하다. 이런 이유로 step-edge 접합은 고온초전도를 이용한 전자 소자 제작에 주로 쓰이게 될 것으로 보인다. 그러나, step-edge 접합을 응용하기 위해서는 여러가지 step-edge 조건에 대한 구조적인 연구가 선행되어야 한다. 실험적인 결과들에 대한 해석을 위해 pairing wave 함수의 개념을 사용하는데 이 중에서 $d_{x^2-y^2}$ 대칭성에 기반을 둔 것이 가장 설득력이 있다[4],

[5].

Tsuei et al.[6]과 Wollman et al.[7] 등이 발표한 실험적인 내용들도 $d_{x^2-y^2}$ 대칭성을 설명해 주고 있다. 또한, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) grain boundary 접합의 임계 전류에 대한 실험적인 결과도 이 $d_{x^2-y^2}$ 대칭성을 잘 설명해 주고 있다[1]. Step-edge 접합은 두 개의 grain boundary를 포함하고 있고, 아직까지 d-wave 대칭성과의 상관관계에 대한 체계적인 연구가 보고되지 않았다.

본 연구에서는 d-wave 대칭성이 YBCO step-edge 조셉슨 접합의 임계 전류에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구를 하였다. 최근에 본 연구팀에서 얻어낸 실험적 결과[8]를 기초로 하여 d-wave 대칭성과 연관한 step-edge 접합의 이론적 모델을 제안하고 모델을 통한 예상과 실험적 결과를 비교하였다.

II. 이론적 모델

$d_{x^2-y^2}$ 대칭성에 기반을 둔 gap 함수는 다음과 같은 식을 만족한다.

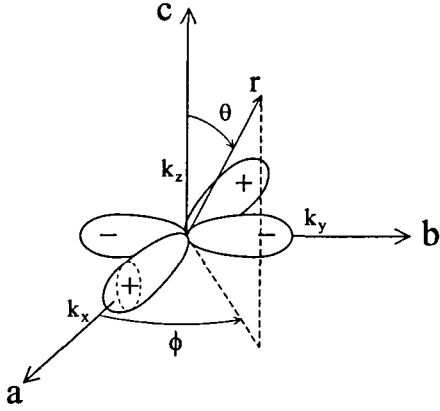


Fig. 1. Gap function of the d_{x^2,y^2} pairing superconductor.

$$\Delta(k) \sim k_x^2 - k_y^2 = (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \sin \theta$$

$$= \cos(2\phi) \sin \theta$$

여기서, 각 ϕ 와 θ 에 대한 것은 figure 1에 정의하였다. Figure 2는 step line이 a-축에 대해 각 ϕ 만큼 틀어진 step-edge 접합을 보여주고 있다. Step-edge에 두 개의 grain boundary가 존재하는데, 하나는 edge의 상단에 다른 하나는 하단에 위치하고 있다. SrTiO₃ 기판 위에 step-edge 접합을 만들려면 step의 경사각이 45° 이상이 되어야 그 step 위에 입혀지는 박막의 c-축이 기판 면과 평행하게 되고 step 부분에서는 step line에 대해 수직하게 된다. 그러나, MgO 기판의 경우에는 박막이 step-edge 면을 따라 c-축

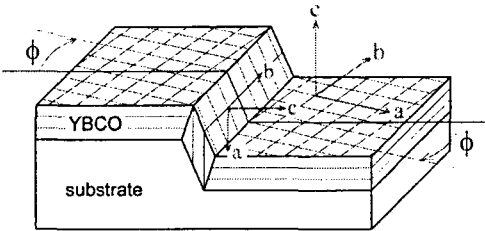


Fig. 2. Crystal orientations in a step-edge junction. The in-plane misorientation angle ϕ is the same as the step-line angle. Note that c-axis of the film on the edge is parallel to the substrate plane and perpendicular to the step line.

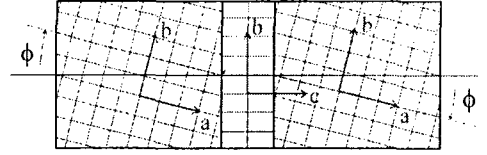


Fig. 3. Top view of the junction. The in-plane misorientation angle in the middle part of the film is zero.

이 성장한다[9]. Figure 3은 접합을 위에서 본 그림이다. 이 그림을 통해 step-edge 접합을 통해 흐르는 임계 전류는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c \sim \cos^2(2\phi)$$

Figure 4는 두 가지 경우의 접합에 대한 단면도이다. 이 경우에 임계 전류에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c \sim \sin \theta_1 \sin \theta_1' \sin \theta_2 \sin \theta_2'$$

특히, c-축이 기판 면에 수직인 경우에는 다음과 같다.

$$I_c \sim \sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2), \quad (\theta_1(2) + \theta_1'(2) = \pi/2).$$

그러므로, Figure 4(a)의 경우의 접합 임계 전류는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_c \sim I_{\max} \cos^2(2\phi) \sin(2\theta_1) \sin(2\theta_2)$$

각 ϕ 가 증가함에 따라 I_c 는 $\Delta\phi=90^\circ$ 의 주기로 modulation한다. $\phi=0^\circ$ 와 90° 에서 I_c 가 최대가 되고, 45° 에서 최소가 된다. 이 때, θ_1 과 θ_2 는 접합이 형성될 때 결정되는 값으로 임의로 조절되는 값이 아니다. 소자로 이용되는 대부분의 step-edge 접합은 $\phi=0^\circ$ 나 90° 에서 접합을 제작하므로, θ_1 과 θ_2 에 의해 접합의 임계 전류가 결정된다. 그러므로, step-edge 접합의 I_c 는 한 개의 grain boundary 접합에 비해 두 배 분산된 형태를 보일 것이다.

YBCO의 구조가 orthorhombic이므로, gap 함수를 순수한 tetragonal d-wave로 기술할 수는

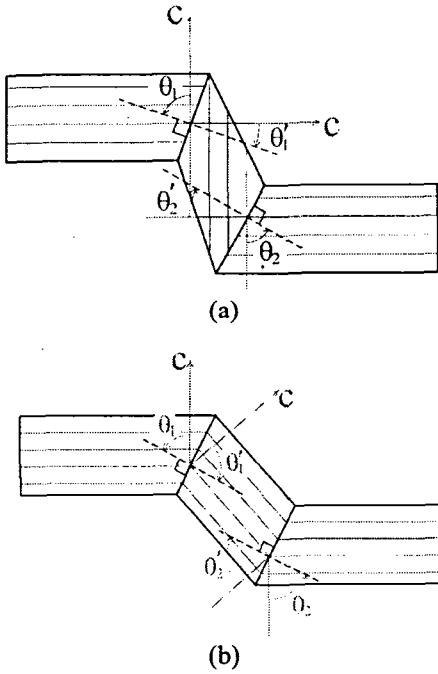


Fig. 4. Cross-sectional view of the junction: (a) for a SrTiO₃ (100) step-edge with a slope angle larger than 45°, the c-axis of the edge film is perpendicular to that of the planar part, and (b) for a MgO substrate step-edge, the c-axis of the edge film is perpendicular to the local substrate surface.

없다. 대신, s-wave와 d-wave의 혼합된 형태이면서 $d_{x^2-y^2}$ 의 영향이 두드러진 것으로 보는 것이 더 바람직하다. Pb를 이용한 접합에서부터 c-축 성장된 YBCO까지 조셉슨 터널링에 대한 실험들이 순수한 d-wave 성질로부터 약간 벗어난 결과를 보이고 있다[10], [11]. 마찬가지로 step-edge 접합에서도 s-wave 향이 작게 존재하는 것으로 보여진다. $\phi=45^\circ$ 로부터 멀리 떨어진 각도에서의 터널링에서는 s-wave의 영향이 작아서 무시할 수 있지만, 어떤 경우에는 s-wave 향에 의한 영향이 상당히 클 것이다. 따라서, 위에 기술한 임계 전류에 관한 식에 s-wave 터널링에 의한 항이 더해져야 한다.

Figure 5는 step-line 각 ϕ 에 따른 YBCO step-edge 접합의 임계 전류 값 그래프이다. 1 cm × 1 cm 크기의 STO(100) 기판 위에 step-line 각 ϕ

를 0°부터 165°까지 15°씩 증가하도록 모두 12개의 접합을 제작하였다. 기판의 step은 PR 마스크와 Ar 이온 밀링으로 제작하였고, 그 위에 PLD를 이용하여 YBCO 박막을 입혔다. Step 각의 균일성을 위해 밀링시 기판을 일정한 속도로 회전시켰고 이온 빔 입사각은 20°로 하였다. 제작된 step 각은 약 60°도 정도였다[8].

Figure 5에서 볼 수 있듯이 0°나 75-90° 근방에서 I_c 값이 최대값을 나타내고 상대적으로 30-45°나 135° 근방에서 최소값을 보이고 있다. 비록 일부 data에서 약간의 편차를 보이지만 전체적인 결과의 양상이 이론하고 잘 맞는다는 것을 확인할 수 있다. Figure 5에서 임계 전류 값 I_c 의 크기가 기판마다 다르게 나온 것을 볼 수 있다. 이처럼 그 차이가 큰 이유는 박막 Tc의 차이와 접합 제작시 임의로 조절이 불가능한 misorientation 각 θ_1 과 θ_2 의 차이로부터 기인한 것으로 보인다.

Equation 5를 보면 ϕ 가 45°가 되면 I_c 값은 0이 되나 figure 5에서 I_c 값의 항상 0 이상이다. 이것에 대한 이유로 앞에서도 언급했듯이 step line의 미세구조와 gap 함수가 s-d wave의 혼합 상태로 되어있기 때문인 것으로 보인다. Mannhart등은 bicrystal grain boundary가 들쭉날쭉하여 임계 전류의 국부적인 분포가 d-wave 대칭성과 관련있는 boundary의 방향성에 의해 결정된다는 것을 보였다[12]. Step-edge 접합의 grain boundary도 비슷한 구조이나, 재현성이 다

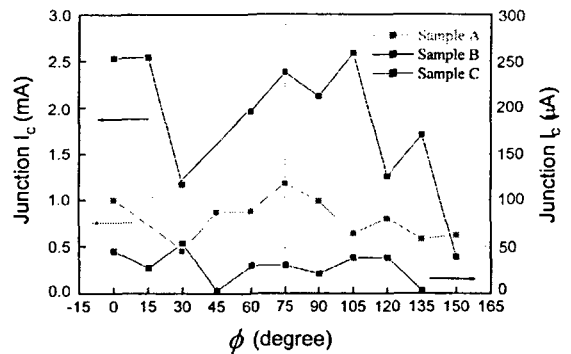


Fig. 5. Junction critical current as a function of the step-line angle for junctions on three different substrates. Sample A and B were measured at 77 K and sample C at 70 K.

소 떨어진다. 따라서, figure 5의 일부 data가 편차를 보이는 것은 재현성으로 인한 문제로 보여진다. 또한, 임계 전류의 최소값이 0이 아닌 유한한 값을 가지는 이유는 s-d wave의 혼합된 상태에서 비롯된 것으로 보여진다.

III. 결론

본 논문에서는 step-edge 접합의 임계 전류에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험적 결과와 비교하였다.

이론은 YBCO 초전도의 $d_{x^2-y^2}$ 대칭성을 기반으로 하였고, 임계 전류가 0° 와 90° 에서 최대가 되고 45° 나 135° 에서 최소가 되는 주기적인 형태를 보일 것으로 예측했다. 실험적 결과와의 비교를 통해 앞에서 제시한 이론과 잘 일치함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 기초과학연구지원사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

[1] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, Phys. Rev. Lett. 61, 219 (1998).

[2] R. W. Simon, J. F. Burch, K. P. Daly, W. D. Dozier, R. Hu, A. E. Lee, J. M. S. Wire, and M. J. Zani, *Science and Technology of Thin Film Superconductors 2*, pp. 549-558, New York: Plenum Press (1990).

[3] J. Gao, W. A. M. Aarnick, G. J. Gerritsma, and H. Rogalla, Physica C, vol. 171, pp. 126-130, (1990).

[4] N. E. Bickers, D. J. Scalapino, and S. R. White, Phys. Rev. Lett. 62, 961 (1989).

[5] P. Monthoux, A. V. Balasky, and D. Pines, Phys. Rev. B 46, 14803 (1992)

[6] C. C. Tsuei, J. R. Kirtley, C. C. Chi, L. S. Yu-Jahnes, A. Gupta, T. Shaw, J. Z. Sun, and M. B. Ketchen, Phys. Rev. Lett. 73, 593 (1994)

[7] D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D. M. Ginsberg, and A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. 71, 2134 (1993).

[8] Y. Hwang, B. C. Nam, M. C. Lee, D. W. Kim, S. G. Lee, I. S. Kim, J. T. Kim, Y. K. Park, and I. H. Song, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 4285 (1999).

[9] S. Kuriki, T. Kmiyama, D. Suzuki, and M. Matsuda, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3, 2461 (1993).

[10] A. S. Katz, A. G. Sun, and R. C. Dynes, Appl. Phys. Lett. 66, 105 (1995).

[11] R. Kleiner, A. S. Katz, A. G. Sun, R. Summer, D. A. Gajewski, S. H. Han, S. I. Woods, E. Dantsker, B. Chen, K. Char, M. B. Maple, R. C. Dynes, and John Clarke, Phys. Rev. Lett. 76, 2161 (1996).

[12] J. Mannhart, H. Hilgenkamp, and Ch. Gerber, Physica C 282-287, 132 (1997).